

**Object range and relative velocity measuring method uses evaluation of alternating frequency-shifted signal sections reflected from detected object**

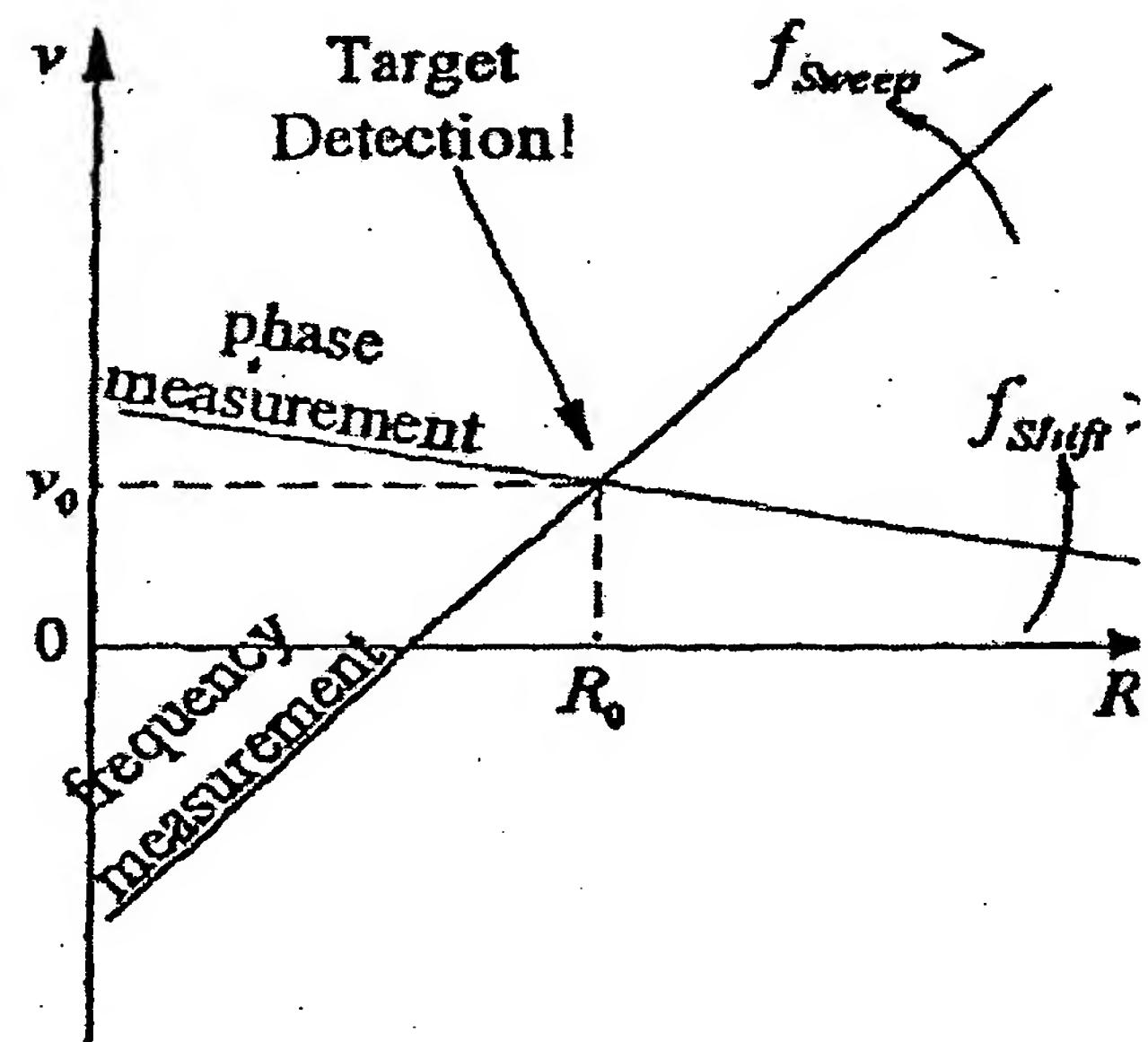
**Patent number:** DE10050278  
**Publication date:** 2002-04-25  
**Inventor:** MEINECKE MARC-MICHAEL (DE); ROHLING HERMANN (DE); MENDE RALPH (DE)  
**Applicant:** S M S (DE)  
**Classification:**  
- **international:** G01S13/34; G01S13/58; G01S13/93; G01S13/00;  
(IPC1-7): G01S13/93; G01S13/34; G01S13/58  
- **european:** G01S13/34; G01S13/58F1  
**Application number:** DE20001050278 20001010  
**Priority number(s):** DE20001050278 20001010

**Also published as:**

- WO0231529 (A3)
- WO0231529 (A2)
- US6864832 (B2)
- US2003179128 (A)
- CA2415953 (A1)

**Report a data error here****Abstract of DE10050278**

The range and relative velocity measuring method uses transmission of electromagnetic signals over a measuring interval in the form of alternating signal sections (A,B) with a relative frequency shift modulated in frequency over a given modulation range ( $f_{\text{sweep}}$ ), with evaluation of the phase differences of the echo signals provided by reflection from the detected object for each signal section. An Independent claim for a device for measuring the range and relative velocity of an object is also included.



---

Data supplied from the esp@cenet database - Worldwide

(19) BUNDESREPUBLIK

DEUTSCHLAND



DEUTSCHES

PATENT- UND  
MARKENAMT

# Offenlegungsschrift

(10) DE 100 50 278 A 1

(51) Int. Cl. 7:

G 01 S 13/93

G 01 S 13/34

G 01 S 13/58

(21) Aktenzeichen: 100 50 278.4  
(22) Anmeldetag: 10. 10. 2000  
(43) Offenlegungstag: 25. 4. 2002

(71) Anmelder:  
s.m.s., Smart Microwave Sensors GmbH, 38106 Braunschweig, DE  
(74) Vertreter:  
GRAMM, LINS & PARTNER, 38122 Braunschweig

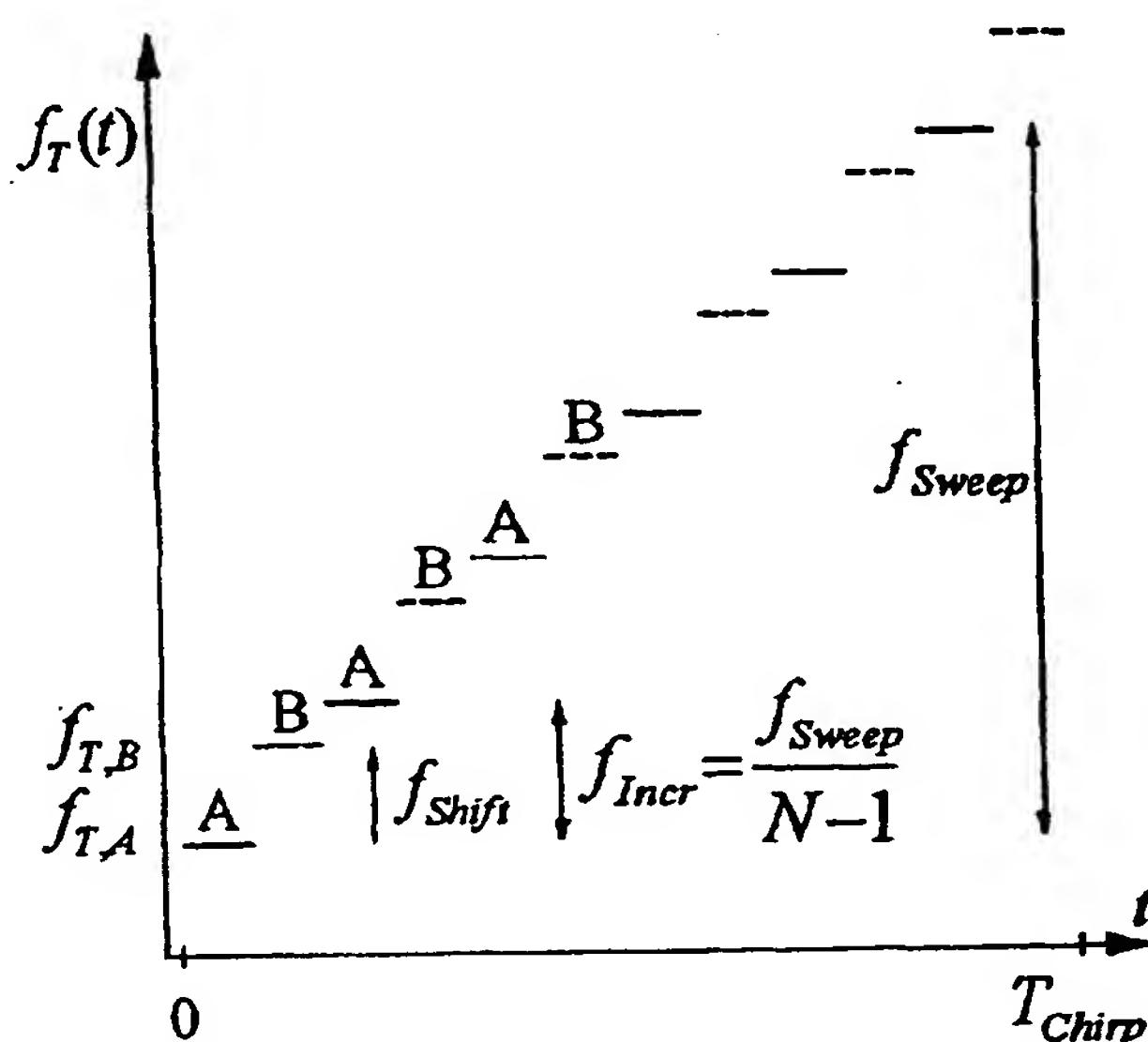
(72) Erfinder:  
Meinecke, Marc-Michael, 21077 Hamburg, DE;  
Rohling, Hermann, 38304 Wolfenbüttel, DE; Mende,  
Ralph, 38102 Braunschweig, DE  
(56) Entgegenhaltungen:  
DE 44 33 790 A1  
US 59 63 163 A  
EP 09 40 689 A1  
ABOSETTA, M. M.: COOPER, D. C.: Noise analysis of digitised FMCW radar waveforms. In: IEE Proc. Sonar, Navig., 1998, Vol. 145, No. 4, S. 209-215;

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

(54) Verfahren und Vorrichtung zur Bestimmung von Abstand und Relativgeschwindigkeit eines entfernten Objektes

(57) Die Bestimmung von Abstand R und Relativgeschwindigkeit v wenigstens eines entfernten Objekts von einem Beobachtungspunkt mit Hilfe von vom Beobachtungspunkt ausgesandten elektromagnetischen Signalen in Form von abwechselnd ausgesandten Signalabschnitten (A, B) einer ersten Frequenz und einer zweiten Frequenz, die nach einer Reflexion an dem Objekt empfangen und ausgewertet werden, gelingt mit einer hohen Genauigkeit und einer kurzen Reaktionszeit dadurch, dass die Signalabschnitte (A, B) der beiden Frequenzen während eines Messintervalls über einen Modulationsbereich ( $f_{Sweep}$ ) um jeweils einen Frequenzschritt ( $f_{Incr}$ ) verschoben ausgesandt werden.



DE 100 50 278 A 1

DE 100 50 278 A 1

## Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bestimmung von Abstand und Relativgeschwindigkeit eines entfernten Objektes von einem Beobachtungspunkt mit Hilfe von vom Beobachtungspunkt ausgesandten elektromagnetischen Signalen vorzugsweise Radarsignalen, in Form von abwechselnd ausgesandten Signalabschnitten einer ersten Frequenz und einer zweiten Frequenz, die nach einer Reflexion an dem Objekt empfangen und ausgewertet werden.

[0002] Die Erfindung betrifft ferner eine Vorrichtung zur Bestimmung von Abstand und Relativgeschwindigkeit eines entfernten Objektes zur Vorrichtung mit Hilfe einer elektromagnetischen Sendeeinrichtung vorzugsweise Radarsende-einrichtung, zur Aussendung von Signalabschnitten einer ersten und einer zweiten Frequenz und einer Empfangseinrich-tung zum Empfang der von dem Objekt reflektierten Signalabschnitte.

[0003] Das Hauptanwendungsgebiet der vorliegenden Erfindung liegt in der Verwendung im Automobilbereich, wo derartige Verfahren zur adaptiven Zielführung mit 77 GHz-Radaren bekannt sind. Für Sicherheitsanwendungen wie die Verhinderung von Zusammenstößen oder ein führerloses Fahren wird eine hohe Zuverlässigkeit und geringe Reaktionszeit benötigt, die in den bisherigen Zielführungssystemen nicht realisiert ist.

[0004] Das eingangs erwähnte gattungsgemäße Verfahren und die entsprechende Vorrichtung beruhen auf der Aussendung von Signalabschnitten mit einer festen Frequenz, wobei die von Objekt reflektierten Signalabschnitte regelmäßig mit der entsprechenden Sende-frequenz gemischt werden, sodass im Basisband ein Messsignal für die Dopplerfrequenz bei bewegten Objekten entsteht.

[0005] Bei einer Frequenz-Shift-Codierung (Frequency Shift Keying – FSK) werden Signalabschnitte mit zwei ver-schiedenen Frequenzen während eines sogenannten coherenten Verarbeitungsintervalls (Coherent Processing Interval – CPI) ausgesandt. Das Echosignal kann beispielsweise mit einem Homodyn-Empfänger in das Basisband umgesetzt werden. Der Frequenzabstand zwischen den beiden Frequenzen ist dabei sehr klein gegenüber den Frequenzen selbst. Das zeitdiskrete Empfangssignal wird innerhalb jedes CPI Fourier-transformiert und mit Hilfe eines Schwellwertdetektors detektiert. Für die Detektion wird vorzugsweise das CFAR-Verfahren angewendet. Die Echosignale der beiden Frequenzen führen zu einer gleichen Dopplerfrequenzposition, da die Differenzfrequenz zwischen den beiden Frequenzen sehr klein gegenüber den Frequenzen selbst ist. Ausgrund der unterschiedlichen Frequenzen ergeben sich für beide Echosignale jedoch unterschiedliche Phaseninformationen. Die Phasendifferenz  $\Delta\phi$  bildet die Basis für die Bestimmung des Abstandes R. Es gilt:

$$R = \frac{c \cdot \Delta\phi}{4 \pi \cdot f_{Step}},$$

wobei  $f_{Step}$  der Frequenzabstand zwischen den beiden Signalabschnitten ist. Dieses Verfahren lässt sich relativ einfach durch eine entsprechende Modulation eines spannungsgesteuerten Oszillators (Voltage Control Oscillator – VCO) realisieren. Allerdings erlaubt das Verfahren keine Entfernungsauflösung von Objekten gleicher oder annähernd gleicher Relativgeschwindigkeit in Messrichtung. Für Automobilanwendungen ist dieses Verfahren ungeeignet, da z. B. feststehende Ziele, wie z. B. Verkehrsschilder, Laternen, Bäume, zu vielfachen, nicht voneinander zu trennenden Echosignalen führen. Auch sich bewegende Objekte können, wenn sie eine annähernd gleiche Relativgeschwindigkeit zur Sendeeinrichtung haben, nicht in der Entfernung aufgelöst werden. Ein solcher Zustand, der ein derartiges Auflösungsproblem beinhaltet, ist für eine automatische Auswertung nicht erkennbar, sodass Fehlauswertungen unvermeidlich sind.

[0006] Ein anderes bekanntes Verfahren verwendet eine lineare Frequenzmodulationstechnik (LFM), bei der die Sende-frequenz mit einer dreieckigen Wellenform über einen Modulationsbereich  $f_{Sweep}$  moduliert wird. Die Bereichsauflö-sung

$$\Delta R = \frac{c}{2 \cdot f_{Sweep}}$$

führt bei einem einmaligen Überstreichen des Modulationsbereichs zu einer mehrdeutigen Messung für den Abstand und die Relativgeschwindigkeit. Wenn innerhalb eines einzelnen CPI das abgemischte Empfangssignal digitalisiert und Fouriertransformiert wird, entsteht im Fourierspektrum ein Peak an der Stelle  $\kappa$ . Die Mehrdeutigkeiten für den Abstand und die Geschwindigkeit können durch folgende Gleichungen dargestellt werden:

$$K = \frac{v}{\Delta v} - \frac{R}{\Delta R} \quad \longleftrightarrow \quad \frac{v}{\Delta v} = \frac{R}{\Delta R} + K,$$

wobei  $\Delta v$  die Geschwindigkeitsauflösung angibt, die sich aus der CPI-Länge  $T_{Chirp}$  ergibt  
 $(\Delta v = \frac{\lambda}{2 \cdot T_{Chirp}})$ .

[0007] Wegen der Mehrdeutigkeiten werden mehrere Messungen mit unterschiedlichen Steigungen der Frequenzveränderung ausgeführt. Dadurch wird allerdings die Messzeit in unerwünschter Weise verlängert, was zu einer Beeinträchtigung der für Sicherheitsanwendungen gewünschten kurzen Reaktionszeit führt.

[0008] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, die Bestimmung von Abstand und Relativgeschwindigkeit mit ei-nem Verfahren und/oder einer Vorrichtung der eingangs erwähnten Art anzugeben, die eine für Sicherheitsanwendungen

# DE 100 50 278 A 1

hohe Zuverlässigkeit und kurze Reaktionszeit ermöglicht.

[0009] Ausgehend von dieser Problemstellung ist ein Verfahren der eingangs erwähnten Art erfindungsgemäß dadurch gekennzeichnet, dass die Signalabschnitte der beiden Frequenzen während eines Messintervalls über einen Modulationsbereich um jeweils einen Frequenzschritt verschoben ausgesandt werden. Dementsprechend ist auch eine erfindungsgemäß Vorrichtung ausgebildet.

[0010] Die erfindungsgemäß Bestimmung von Abstand und Relativgeschwindigkeit erlaubt überraschend einfach eindeutige Abstands- und Geschwindigkeitsmessungen. Erfindungsgemäß werden die beiden Signalabschnitte mit unterschiedlichen Frequenzen schrittweise über den endlichen Modulationsbereich 20 frequenzmoduliert. Das empfangene Echosignal kann in üblicher Weise in das Basisband heruntergemischt und am Ende jedes Frequenzschrittes ausgewertet werden.

[0011] Jede der beiden Signalsequenzen kann separat durch eine Fouriertransformation und eine Schwellwertdetektion ausgewertet werden. Ein einzelnes Objekt mit einem bestimmten Abstand und einer bestimmten Geschwindigkeit wird in beiden Sequenzen bei dem selben ganzzahligen Index  $\kappa = \kappa_A = \kappa_B$  im fouriertransformierten Ausgangssignal der beiden ausgewerteten Spektren detektiert. In beiden Signalsequenzen werden dieselben Abstands- und Geschwindigkeits-Mehrdeutigkeiten, die oben erwähnt worden sind, auftreten. Die gemessenen Phasen  $\varphi_A$  und  $\varphi_B$  der beiden komplexen Spektralpeaks unterscheiden sich und enthalten die differenzierende Abstands- und Geschwindigkeitsinformation, die zur Auflösung der Mehrdeutigkeit verwendet werden kann. Aufgrund der kohärenten Messtechnik in den beiden Sequenzen kann die Phasendifferenz  $\Delta\varphi = \varphi_B - \varphi_A$  für die Abstandsbestimmung und die Geschwindigkeitsbestimmung ausgewertet werden. Die Phasendifferenz  $\Delta\varphi$  kann analytisch durch die folgende Gleichung beschrieben werden:

$$\Delta\varphi = \frac{\pi}{N-1} \cdot \frac{v}{\Delta v} - 4\pi \cdot \frac{f_{\text{Shift}}}{c}$$

wobei N die Anzahl der Frequenzschritte in jeder Sendesignalsequenz A und B der beiden verschiedenen Frequenzen ist. Bei der ersten Berechnung ist  $\Delta\varphi$  mehrdeutig, jedoch können die Mehrdeutigkeiten durch die Kombination der Messergebnisse gemäß den obigen Gleichungen aufgelöst werden. Der Schnittpunkt der beiden Messresultate führt zu einer eindeutigen Bestimmung des Abstands und der Relativgeschwindigkeit.

[0012] Während bei der herkömmlichen Frequenzshift-Codierung (FSK) die Signalabschnitte der beiden Frequenzen jeweils so lange ausgesendet werden, dass die empfangenen Echosignale mit der gewünschten Abtastrate (z. B. 64 samples) vollständig abgetastet und die Abtastwerte der zugehörigen Auswertungseinrichtung (z. B. Fouriertransformation) zugeleitet werden, bevor die Abtastung des folgenden Signalabschnitts der anderen Frequenz durchgeführt und die Abtastwerte der dazu gehörenden anderen Auswertungseinrichtung zugeführt werden, sind die erfindungsgemäß verwendeten Signalabschnitte wesentlich kürzer. Die Umschaltung auf die andere Frequenz findet statt, bevor alle nötigen Abtastwerte für die eine Frequenz gesammelt worden sind. Im bevorzugten Fall wird für jeden Signalabschnitt nur ein Abtastwert detektiert, sodass die Abtastwerte abwechselnd den Auswertungseinrichtungen der einen und der anderen Frequenz zugeleitet werden, bis in einem Messintervall die benötigte Anzahl von Abtastwerten für die beiden Frequenzen erhalten worden sind.

[0013] Durch diese abwechselnd verwobene Aussendung der Teilsignale lassen sich gute Entfernungsauflösungen mit kurzer Messzeit realisieren und auch dynamische Zielbewegungen gut detektieren.

[0014] Für eine Vereinfachung der Berechnung ist es zweckmäßig, wenn der Abstand der beiden Frequenzen über den gesamten Modulationsbereich gleich bleibt. Prinzipiell ist eine geringe Veränderung der beiden Frequenzen, d. h. ein unterschiedlicher Frequenzhub für die beiden Frequenzen akzeptabel und ggf. mit Vorteil ausnutzbar.

[0015] Bevorzugt ist ferner, dass für jedes Aussenden der Signalabschnitte der beiden Frequenzen die Verschiebung um einen Frequenzschritt vorgenommen wird, da die Aussendung von Signalabschnitten mit gleicher Frequenz lediglich redundante Messungen entstehen würden.

[0016] Für eine vereinfachte Auswertung ist es ferner zweckmäßig, wenn der Frequenzschritt dem Doppelten des Abstands der beiden Frequenzen entspricht.

[0017] Das erfindungsgemäß Verfahren eignet sich sowohl für eine kontinuierliche Aussendung der abwechselnden Signalabschnitte als auch für einen Impulsbetrieb, bei dem zwischen der Aussendung eines Signalabschnitts der einen Frequenz und der Aussendung eines Signalabschnitts der anderen Frequenz ein zeitlicher Abstand eingehalten wird. Soll das nach dem Aussenden des Signalabschnitts empfangene Signal heruntergemischt werden, kann hierfür der Sendeoszillator mit der Trägerfrequenz weiter laufen.

[0018] Die Erfindung soll im Folgenden anhand von in der Zeichnung dargestellten Ausführungsbeispielen näher erläutert werden. Es zeigen:

[0019] Fig. 1 das Prinzip der erfindungsgemäß ausgesendeten Wellenformen

[0020] Fig. 2 ein graphisch dargestelltes Prinzip zur Lösung der Mehrdeutigkeiten der Messungen

[0021] Fig. 3 ein Beispiel für eine optimierte erfindungsgemäß Wellenform

[0022] Fig. 4 ein Diagramm gemäß Fig. 2 für einen optimierten Frequenzschritt.

[0023] Fig. 1 zeigt Signalabschnitte A, die von einer Ausgangsfrequenz  $f_{T,A}$  jeweils um einen Frequenzschritt  $f_{\text{Incr}}$  zueinander versetzt sind. Die Signalabschnitte A werden abwechselnd mit Signalabschnitten B ausgesandt, die ausgehend von einer Ausgangsfrequenz  $f_{T,B}$  ebenfalls um jeweils einen Frequenzschritt versetzt sind, um so einen Modulationsbereich  $f_{\text{Sweep}}$  zu überstreichen. Die Frequenzschritte  $f_{\text{Incr}}$  sind über den Modulationsbereich  $f_{\text{Sweep}}$  gleich groß, sodass gilt

$$f_{\text{Incr}} = \frac{f_{\text{sweep}}}{N-1}$$

# DE 100 50 278 A 1

[0024] Die beiden so ineinander verwobenen Signalabschnittsfolgen A, B werden ausgesandt und nach dem Empfang der Echosignale separat durch Fouriertransformation und Schwellwerttechnik ausgewertet. Durch die oben erwähnte Kombination der Messergebnisse wird unter Berücksichtigung der Phasendifferenz  $\Delta\phi$  eindeutige Messergebnisse erhalten zu:

$$R_0 = \frac{c \cdot \Delta R}{\pi} \cdot \frac{(N-1) \cdot \Delta\phi - \pi \cdot K}{c - 4 \cdot (N-1) \cdot f_{shift} \cdot \Delta R}$$

$$v_0 = \frac{(N-1) \cdot \Delta v}{\pi} \cdot \frac{c \cdot \Delta\phi - 4\pi \cdot f_{shift} \cdot \Delta R \cdot K}{c - 4 \cdot (N-1) \cdot f_{shift} \cdot \Delta R}$$

[0025] Fig. 2 verdeutlicht, dass die Phasenmessung und die Frequenzmessung an sich mehrdeutig sind, dass aber die Kombination der beiden Messungen zu einem Schnittpunkt der Geraden führt, der die gewünschten Werte für  $R_0$  und  $v_0$  ermitteln lässt.

[0026] In einem Beispiel für Automobilanwendungen beträgt die Signalbandbreite  $f_{Sweep} = 150$  MHz, um eine Abstandsauflösung von 1 m zu gewährleisten. Die schrittweise Frequenzmodulation ist in  $N = 256$  separate Bursts A oder B aufgeteilt, sodass sich ergibt

$$f_{incr} = \frac{150 \text{ MHz}}{255} = 588 \text{ kHz}$$

[0027] Die Messzeit innerhalb eines einzelnen Bursts A oder B beträgt beispielsweise 5  $\mu$ s, woraus sich eine Chirp-Dauer der verwobenen Signale von  $T_{Chirp} = 2,56$  ms ergibt, woraus eine Geschwindigkeitsauflösung von

$$\Delta v = \frac{c}{2f_T} \cdot \frac{1}{T_{Chirp}}$$

zu 2,7 km/h ergibt.

[0028] Der Frequenzabstand  $f_{Shift}$  wird auf der Basis einer großen Abstands- und Geschwindigkeitsgenauigkeit optimiert. Die größte Genauigkeit entsteht, wenn der Schnittpunkt der R-Geraden und der v-Geraden aus zwei orthogonalen Linien gebildet ist, wie dies in Fig. 4 dargestellt ist. Für diese Optimierung ist der Frequenzabstand zwischen den Signalfrequenzen A und B

$$f_{Shift} = -\frac{1}{2} \cdot f_{incr}$$

also im vorliegenden Fall 294 kHz. In diesem speziellen Fall ergeben sich die obigen Gleichungen zu

$$\frac{R_0}{\Delta R} = \frac{N-1}{2\pi} \cdot \Delta\phi - \frac{K}{2},$$

50

$$\frac{v_0}{\Delta v} = \frac{N-1}{2\pi} \cdot \Delta\phi + \frac{K}{2}$$

[0029] Es zeigt sich somit, dass mit der erfindungsgemäßen Wellenform in einfacher Weise eine Abstands- und Relativgeschwindigkeitsbestimmung während eines einzigen Chirps möglich ist, also in kürzester Messzeit. Die angegebenen Optimierungen und bevorzugten Ausführungsformen führen zu einfachsten Auswertungen und einem geringen Hardware-Aufwand.

## Patentansprüche

65

1. Verfahren zur Bestimmung von Abstand (R) und Relativgeschwindigkeit (v) wenigstens eines entfernten Objekts von einem Beobachtungspunkt mit Hilfe von vom Beobachtungspunkt ausgesandten elektromagnetischen Signalen in Form von abwechselnd ausgesandten Signalabschnitten (A, B) einer ersten Frequenz und einer zweiten

# DE 100 50 278 A 1

Frequenz, die nach einer Reflektion an dem Objekt empfangen und ausgewertet werden, dadurch gekennzeichnet, dass die Signalabschnitte (A, B) der beiden Frequenzen während eines Messintervalls über einen Modulationsbereich ( $f_{Sweep}$ ) um jeweils einen Frequenzschritt ( $f_{Incr}$ ) verschoben ausgesandt werden.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Abstand ( $f_{Shift}$ ) der beiden Frequenzen über den gesamten Modulationsbereich ( $f_{Sweep}$ ) gleichbleibt. 5

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass für jedes Aussenden der Signalabschnitte (A, B) der beiden Frequenzen die Verschiebung um einen Frequenzschritt ( $f_{Incr}$ ) vorgenommen wird.

4. Verfahren nach den Ansprüchen 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass das der Frequenzschritt ( $f_{Incr}$ ) dem Doppelten des Abstandes ( $f_{Shift}$ ) der beiden Frequenzen entspricht.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass die abwechselnden Signalabschnitte (A, B) kontinuierlich ausgesandt und empfangen werden. 10

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass zwischen der Aussendung eines Signalabschnitts (A) der einen Frequenz und der Aussendung eines Signalabschnitts (B) der anderen Frequenz ein zeitlicher Abstand eingehalten wird.

7. Vorrichtung zur Bestimmung von Abstand und Relativgeschwindigkeit wenigstens eines von der Vorrichtung entfernten Objektes mit Hilfe einer elektromagnetischen Sendeeinrichtung zur abwechselnden Aussendung von Signalabschnitten (A, B) einer ersten und einer zweiten Frequenz und einer Empfangseinrichtung zum Empfang der von dem Objekt reflektierten Signalabschnitte, dadurch gekennzeichnet, dass die Signalabschnitte (A, B) der beiden Frequenzen während eines Messintervalls über einen Modulationsbereich ( $f_{Sweep}$ ) um jeweils einen Frequenzschritt ( $f_{Incr}$ ) verschoben ausgesandt werden. 15

8. Vorrichtung nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass der Abstand ( $f_{Shift}$ ) der beiden Frequenzen über den gesamten Modulationsbereich ( $f_{Sweep}$ ) gleichbleibt.

9. Vorrichtung nach Anspruch 7 oder 8, dadurch gekennzeichnet, dass für jedes Aussenden der Signalabschnitte (A, B) der beiden Frequenzen die Verschiebung um einen Frequenzschritt ( $f_{Incr}$ ) vorgenommen wird.

10. Vorrichtung nach den Ansprüchen 7 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass das der Frequenzschritt ( $f_{Incr}$ ) dem Doppelten des Abstandes ( $f_{Shift}$ ) der beiden Frequenzen entspricht. 25

11. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 7 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass die abwechselnden Signalabschnitte (A, B) kontinuierlich ausgesandt und empfangen werden.

12. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 7 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass zwischen der Aussendung eines Signalabschnitts (A) der einen Frequenz und der Aussendung eines Signalabschnitts (B) der anderen Frequenz ein zeitlicher Abstand eingehalten wird. 30

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

35

40

45

50

55

60

65

**- Leerseite -**

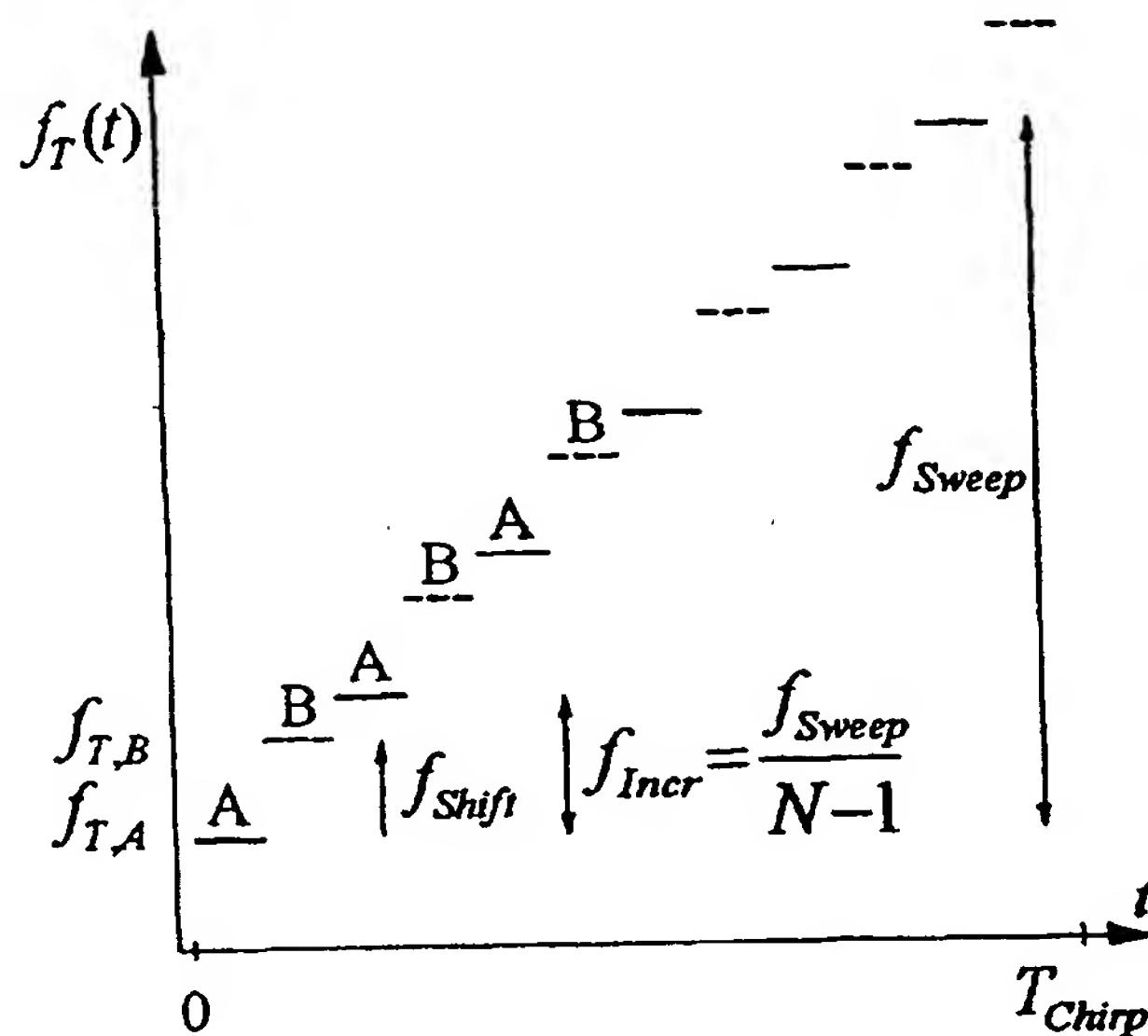


Fig. 1

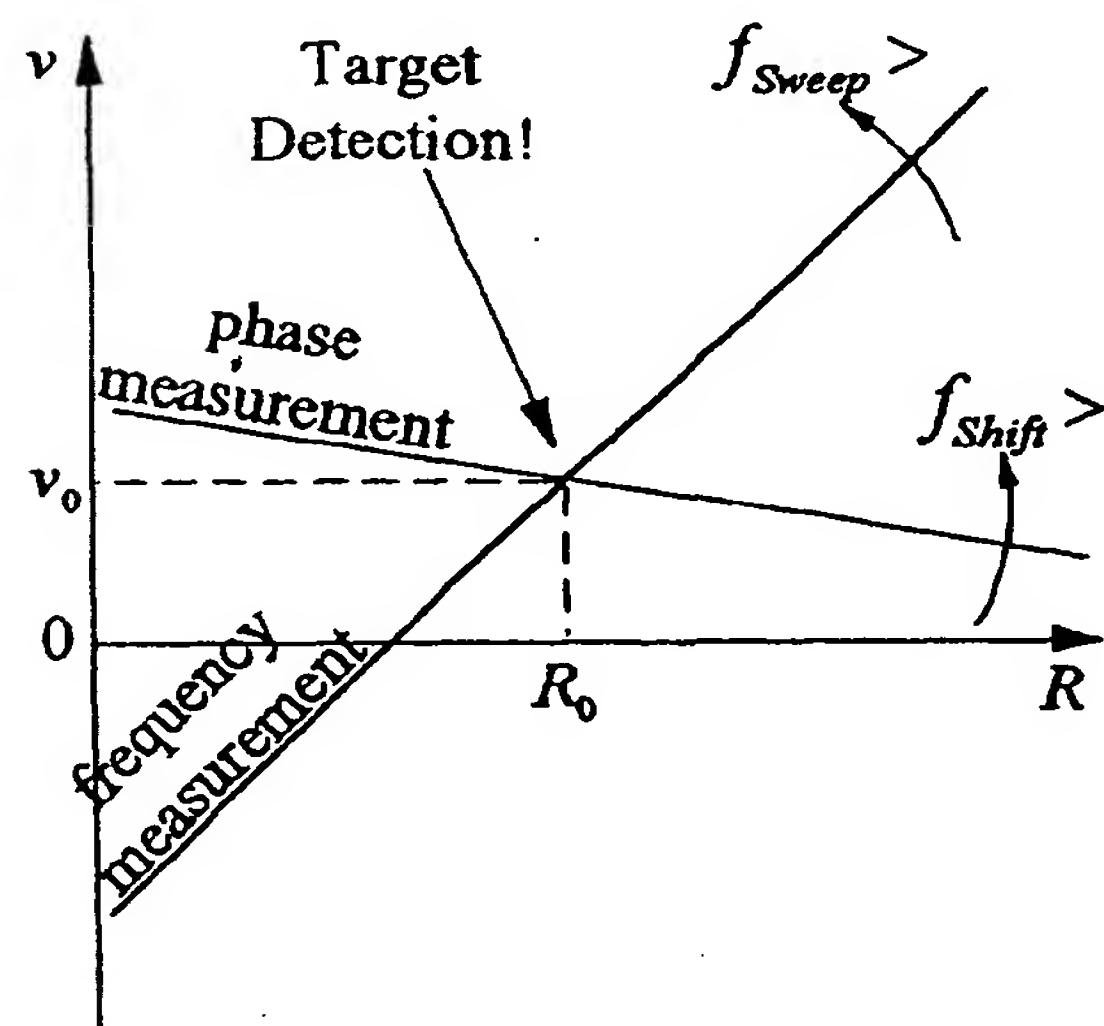
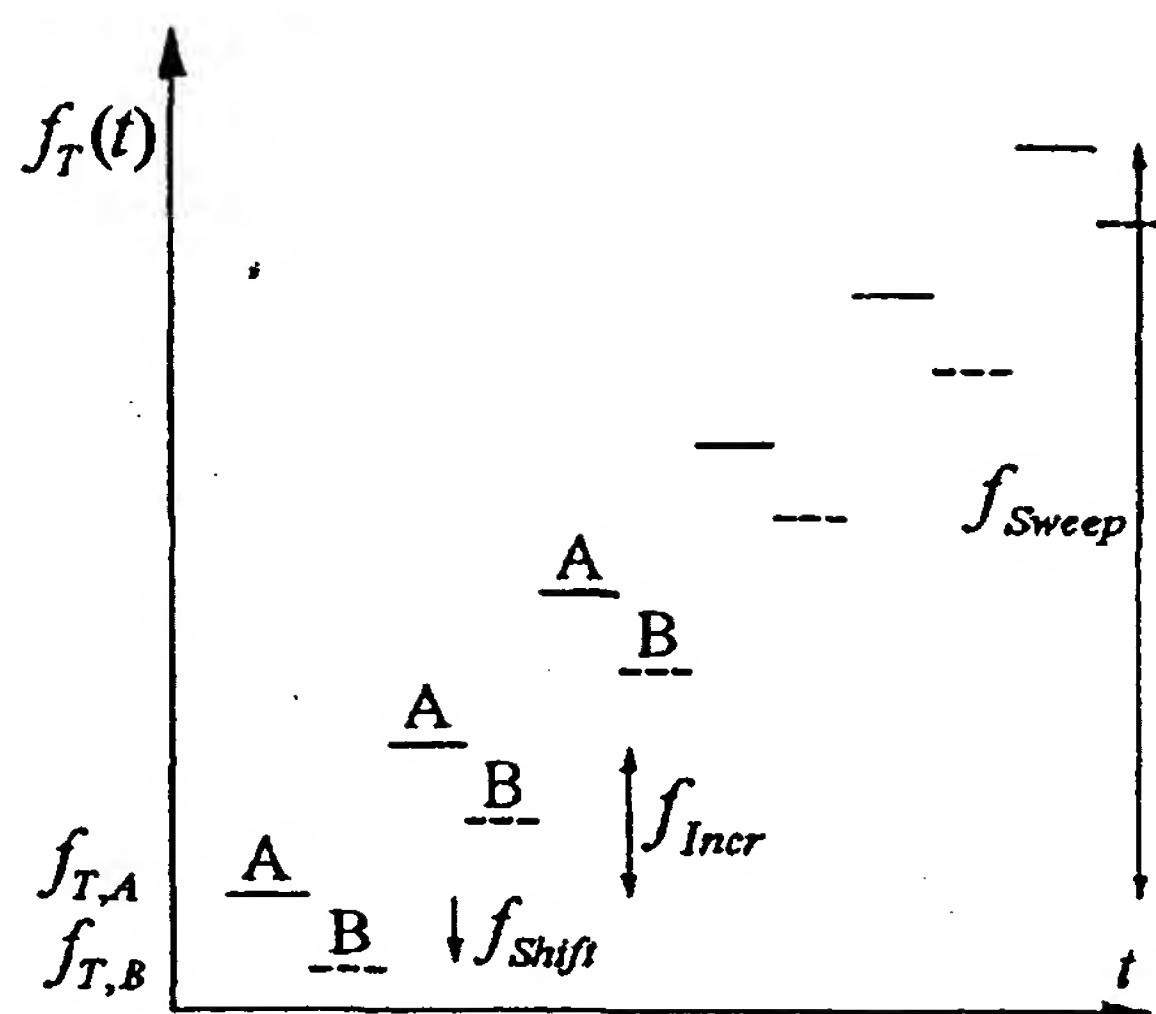
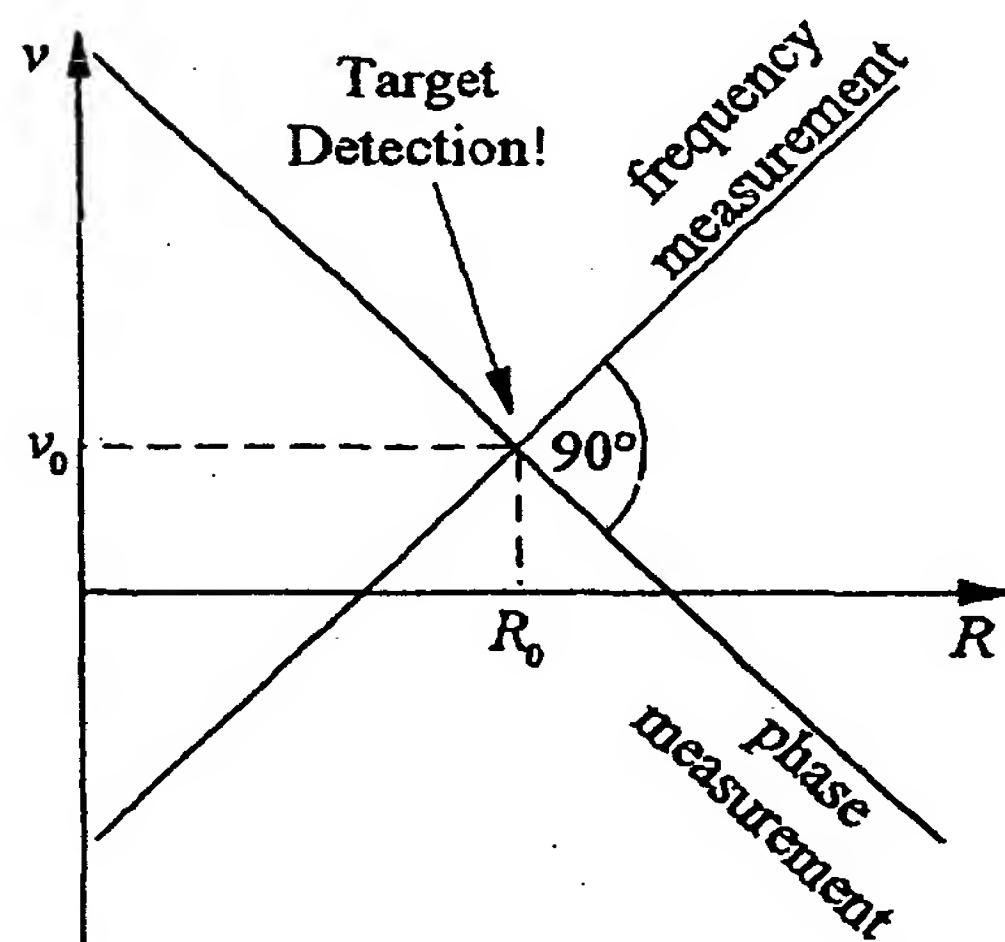


Fig. 2

Fig. 3Fig. 4